

Paritätsverletzung und neue Materialien:  
Anwendungen der Myonen-Spin-Rotation  
 $\mu$ SR  
(oder: warum ein Präsident die Physik  
nicht lassen kann...)

Litterst, Jochen

Veröffentlicht in:  
Jahrbuch 2002 der Braunschweigischen  
Wissenschaftlichen Gesellschaft, S.69-72



J. Cramer Verlag, Braunschweig

JOCHEN LITTERST, Braunschweig

**Paritätsverletzung und neue Materialien:  
Anwendungen der Myonen-Spin-Rotation  $\mu$ SR  
(oder: warum ein Präsident die Physik nicht lassen kann...)**

Braunschweig, 11.10.2002\*

**Was sind Myonen?**

Myonen sind Elementarteilchen, die etwa 200mal so schwer sind wie Elektronen, oder anders betrachtet etwa ein Neuntel der Masse eines Protons besitzen. Analog zu negativ und positiv geladenen Elektronen gibt es positiv und negativ geladene Myonen. Für die  $\mu$ SR-Methoden (Myonen-Spin-Rotation, -Relaxation und -Resonanz) werden in erster Linie positive Myonen  $\mu^+$  eingesetzt. Myonen besitzen wegen ihres intrinsischen Drehimpulses (Spin) ein magnetisches Moment, d.h. in einem Magnetfeld werden die Myonen wie kleine magnetische Kreisel mit einer durch das Magnetfeld vorgegebenen Frequenz präzedieren (Fig.1).

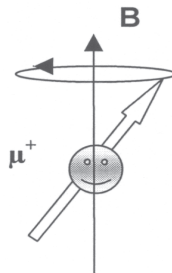


Fig.1: Präzession des Myonenspins in einem Magnetfeld B

Im Gegensatz zu den stabilen Elektronen zerfallen Myonen mit einer mittleren Lebensdauer von etwa  $2.2 \mu\text{s}$  und zwar im Fall des positiv geladenen Myons in ein Positron und zwei Neutrinos (Fig.2). Das Positron  $e^+$  wird dabei vorzugsweise in der Richtung emittiert, in die das magnetische Moment des Myons zu diesem Zeitpunkt zeigt. Dies stellt eine Symmetrieverletzung dar. Sie ist die Folge der Paritätsverletzung beim  $\beta$ -Zerfall.

Durch Messung der Zahl der Zerfallspositronen in einer bestimmten Richtung im Verlauf der nach dem Abstoppen eines Myons in einer Probe verstrichenen Zeit lässt sich das

---

\* Kurzfassung eines Vortrags gehalten in der Klasse für Mathematik- und Naturwissenschaftler der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft.

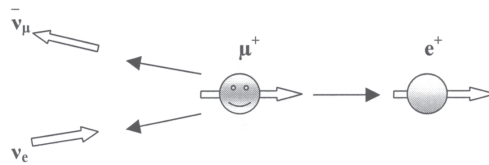


Fig. 2: Zerfall des Myons in ein Positron und zwei Neutrinos (schematische Darstellung). Die offenen Pfeile symbolisieren die Spinrichtungen

am Myonenort wirkende Magnetfeld ermitteln. Diese Technik nennt man Myonen-Spin-Rotation.

### Wozu werden Myonen verwendet?

Mit Myonen lassen sich die Magnetfelder im Inneren jedes Materials im Bereich zwischen den Atomen untersuchen. Die messbaren Felder reichen von etwa einem Zehntel bis zu dem Hunderttausendfachen des Wertes des erdmagnetischen Felds. Für zeitlich fluktuierende Felder besteht ein Sensitivitätsfenster zwischen etwa einem Tausendstel bis herab zu Billionsteln einer Sekunde.  $\mu$ SR ist daher besonders geeignet für das Studium von magnetischen Materialien und Supraleitern. Weiterhin kann man Aufschluss über den Aufenthalt von Wasserstoff und seine Beweglichkeit sowie über Eigenschaften von Defekten in einer Vielzahl technologisch wichtiger Materialgruppen, z.B. Halbleitern, erhalten. Der Materialbereich erstreckt sich von reinen Metallen, über komplexe Legierungen zu chemischen Verbindungen mit unterschiedlichsten Strukturen im kristallinen, amorphen, flüssigen oder gasförmigen Zustand.

### Wie werden Myonen hergestellt?

Myonen wurden erstmals vor ca. 65 Jahren als Folgeprodukte der auf die Erde auftretenden Höhenstrahlung entdeckt. Die für die  $\mu$ SR benötigten Myonen werden in Teilchenbeschleunigern erzeugt. Beim Beschuss z.B. von Graphit mit hochenergetischen Protonen von ca. 600 MeV werden Pionen erzeugt, bei deren Zerfall Myonen entstehen (Fig. 3 und 4). Die Spinrichtung dieser Myonen ist bevorzugt antiparallel zur Flugrichtung der Myonen polarisiert. Auch dies ist eine Folge einer Paritätsverletzung: die entstehenden Neutrinos sind „linkshändig“, d.h. sie sind mit ihrem Drehimpuls antiparallel zu ihrer Flugrichtung polarisiert. Auf Grund der Drehimpulserhaltung muss dann der Spin des Myons entgegengesetzt zum Neutrinospin gerichtet sein.

Die meist genutzten Myonen-Facilities befinden sich am Paul Scherrer Institut PSI (Villigen, Schweiz), an ISIS beim Rutherford-Appleton Laboratory RAL (Chilton, UK), am TRIUMF (Vancouver, Kanada) und am KEK (Tsukuba, Japan).

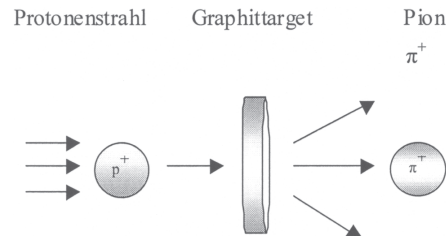


Fig. 3: Herstellung von Pionen durch Beschuss eines Graphittargetes mit Protonen.

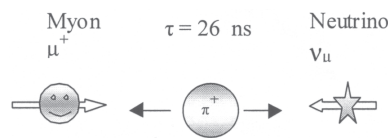


Fig. 4: Zerfall eines Pions in ein Myon und ein Neutrino mit einer mittleren Zerfallszeit von 26 ns

### Neue Entwicklungen

$\mu$ SR-Experimente haben bereits wichtige Beiträge zum besseren Verständnis des Vortex-Zustands [1,2], der superfluiden Dichte [3,4] und dem komplexen Zusammenspiel von Supraleitung und Magnetismus [5,6] in supraleitenden Kupraten (so genannten Hochtemperatursupraleitern) geliefert. Bis vor kurzem war jedoch die  $\mu$ SR-Methode nur auf relativ dicke (mm) Proben beschränkt. Im Rahmen eines u.a. durch das BMBF geförderten Projekts ist es kooperierenden Gruppen des PSI, der Universität Konstanz, der Technischen Universität Braunschweig und der Universität Birmingham weltweit erstmals gelungen, am PSI einen einsatzfähigen niederenergetischen Myonenstrahl im eV bis keV-Bereich bereitzustellen und für  $\mu$ SR einzusetzen (eine Übersicht dazu wird in [7] gegeben). Mit dieser LE- $\mu$ SR (low energy  $\mu$ SR) lassen sich nun auch Schichten im Nanometerbereich studieren, was vollkommen neue Anwendungsfelder eröffnet. Inzwischen werden mehr als  $700 \mu^+$  am Ort der zu untersuchenden Probe erzielt, damit lassen sich bereits in akzeptablen Messzeiten von einigen Stunden gute Resultate erzielen.

Ein typisches Anwendungsbeispiel ist das Studium des Magnetfeldverlaufs in der Nähe der Oberfläche (sowohl innerhalb wie außerhalb) eines Supraleiters. Es gelang den Flusslinienverlauf des so genannten Dreiecks-Flussschlauch-Gitters in einem  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7.8}$  Film zu verfolgen [8] und erstmals das Eindringen eines angelegten Magnetfelds in einen Supraleiter, wie es nach der London-Theorie [9] vorhergesagt wird, direkt zu überprüfen [10].

Zusammenfassend bestätigen die experimentellen Ergebnisse in ausgezeichneter Weise Rechnungen nach dem Londonschen Modell, wodurch das Potenzial der LE- $\mu$ SR deutlich demonstriert wird.

Aktuelle Experimente befassen sich mit dem Diffusionsverhalten von Myonen (in der Rolle eines leichten Wasserstoffisotops) in dünnen Schichten [11], dem Magnetismus dünner Schichten [12], z.B. in Mehrfachschichten mit nichtmagnetischen Zwischenlagen [13]. Viele dieser „neuen Materialien“ besitzen Eigenschaften, die von denen dicker Schichten abweichen. Sie sind deswegen für viele technische Anwendungen, z.B. für Sensoren, interessant.

Wegen des hohen internationalen, wissenschaftlichen Interesses vieler Forschergruppen an dieser neuen Methode wird die Experimentiereinrichtung am PSI zur Zeit wiederum unter Beteiligung der TU Braunschweig erweitert und verbessert, vor allem soll die Myonenausbeute auf etwa das Zehnfache der bisher erzielten gesteigert werden.

Bei der Planung, der Errichtung der Anlage, der Durchführung, Auswertung und Interpretation der Experimente waren zahlreiche Kollegen des PSI (Gruppe Morenzoni), der Universitäten Konstanz (Gruppe Schatz, Niedermayer), Birmingham (Gruppe Forgan) und Zürich (Gruppe Keller) beteiligt, ohne deren tatkräftiges Zusammenwirken diese Ergebnisse nicht möglich geworden wären. Ich möchte hier den Doktoranden und Diplomanden unserer  $\mu$ SR-Arbeitsgruppe vom Institut für Metallphysik und Nukleare Festkörperphysik der Technischen Universität Braunschweig danken und insbesondere den Mitarbeitern, die in der LE- $\mu$ SR aktiv geworden sind: Michael Birke, Hubertus Luetkens, Axel Schatz und Hans-Henning Klauf.

#### Literatur:

- [1] S.L. LEE et al., Phys. Rev. Letters **75**, 922 (1995)
- [2] J.E. SONIER et al., Phys. Rev. Letters **79**, 2875 (1997)
- [3] Y.J. UEMURA et al., Phys. Rev. Letters **66**, 2665 (1991)
- [4] J.L. TALLON et al., Phys. Rev. Letters **74**, 1008 (1995)
- [5] CH. NIEDERMAYER et al., Phys. Rev. Letters **80**, 3843 (1998)
- [6] H.H. KLAUF et al., Phys. Rev. Letters **85**, 4590 (2000)
- [7] E. MORENZONI et al., Hyp. Interact. **133**, 179 (2001)
- [8] CH. NIEDERMAYER et al., Phys. Rev. Letters **83**, 3932 (1999)
- [9] F. LONDON & H. LONDON, Proc. Roy. Soc. London A **149**, 71 (1935)
- [10] T.J. JACKSON et al., Phys. Rev. Letters **84**, 4958 (2000)
- [11] H. LUETKENS et al., Physica **B 326**, 545 (2003)
- [12] H. LUETKENS et al., Physica **B 289-290**, 326 (2000)
- [13] H. LUETKENS et al., Phys. Rev. Letters, eingereicht 2003

---

Prof. und Univ.-Präs. Dr.rer.nat. Jochen Litterst  
 Institut für Metallphysik und Nukleare Festkörperphysik  
 Technische Universität Braunschweig  
 Mendelssohnstr. 3 · D- 38120 Braunschweig